

УДК 66.028.2

О ПРИМЕНЕНИИ ШНЕКОВ В АВТОМАТИЧЕСКИХ ДОЗАТОРАХ ТРУДНОСЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Е.В. Ефремов, С.Н. Ливенцов

Томский политехнический университет

E-mail: efremov@phtd.tpu.ru

Анализируются результаты исследований экспериментальных установок, дозирующих трудносыпучий материал с помощью шнеков. Разработана теоретическая база для расчета вертикально расположенных шнеков, транспортирующих материал вниз. Проведен анализ возможностей применения шнековых дозаторов для автоматического дозирования трудносыпучих материалов.

Ключевые слова:

Трудносыпучий материал, шнек, градуировочная характеристика, автоматизированная система управления.

Автоматизация производственных процессов производств ядерного топливного цикла нередко зависит от решения автоматизации процесса дозирования сыпучих компонентов. Решение этой проблемы имеет большое значение с точки зрения повышения производительности производства, улучшения качества готовой продукции, а также освобождает ряд профессий от опасного для здоровья труда.

Проблема особенно актуальна, если речь идет о дозировании соединений высокообогащенного урана (ВОУ). Последний высвобождается в результате сокращения имеющегося в арсенале ядерного оружия, что приводит к проблеме использования его в мирных целях.

Одним из основных путей применения ВОУ является использование его в энергетических ядерных реакторах. Однако энергетические реакторы работают на низкообогащенном уране с содержанием изотопа уран-235 до 4,4 ат. %, а для ядерных зарядов применяется ВОУ с содержанием изотопа уран-235 до 90 ат. % и выше. Поэтому было создано производство, «разбогащающее» уран путем смешения в газовой фазе гексафторидов урана высокого и низкого обогащения [1].

Высокообогащенный гексафторид урана получают на специальной установке по переработке ВОУ (УП ВОУ), работающей на Сибирском химическом комбинате. Опыт ее эксплуатации показал, что оборудование не в состоянии обеспечить стабильный расход закиси-оксида урана (ЗОУ). Данное вещество, являясь трудносыпучим материалом (ТСМ), порождает проблемы, не возникающие при дозировании материалов, «поведение» которых описывается механикой сплошных сред. Поэтому задача автоматического обеспечения регламентированного режима работы узла загрузки (УЗ), определяющего производительность установки и стабильность технологического процесса, весьма актуальна.

УЗ является элементом узла фторирования. Последний предназначен для фторирования оксида урана фтором в трубчатом реакторе. Сам УЗ состоит из бункера, куда стаканом из поданного через камеру шлюзования контейнера сыпается сырье; шнека, направляющего сырье из бункера в реактор, и электропривода.

Одним из достоинств пламенных реакторов является возможность их полной автоматизации [2]. Осуществлять автоматизированное управление можно, задавая величину концентрации фтора на выходе реактора, и, управляя расходом ЗОУ. Невозможность измерения расхода ЗОУ прямыми способами приводит к необходимости косвенного его измерения по частоте вращения шнека. Поэтому обеспечение точности дозирования и линейности градуировочной характеристики, т. е. зависимости производительности шнека от частоты вращения, являются важными задачами при создании системы автоматизированного управления.

Оценку равномерности подачи ЗОУ шнеком, работающем на УП ВОУ, можно провести по изменению градуировочного коэффициента шнека, т. е. массы ЗОУ, перемещаемого за один оборот. Исследования показывают, что отклонение значений этого коэффициента от среднего достигает 77 %. Эта неравномерность может быть обусловлена зависанием порошка в бункере и неоднозначностью градуировочной характеристики шнека. Зависание порошка в бункере может происходить из-за наличия больших углов откоса в бункере и механических препятствий для истечения порошка. Для устранения сводообразований промышленные шнековые дозаторы снабжаются отсутствующими в УЗ УП ВОУ ворошителями различной конструкции. Неоднозначность градуировочной характеристики шнека может быть связана с малой частотой вращения и с импульсным режимом его работы. Производительность шнека в непрерывном режиме работы выше необходимой, что и приводит к необходимости работы в импульсном режиме с малой частотой вращения. Указанные проблемы характерны для процесса дозирования ТСМ в целом, что затрудняет и ухудшает работу систем автоматизированного управления дозированием.

Под дозированием понимается отмеривание и перемещение определенного количества материала. Величиной, характеризующей процесс дозирования, является расход. При работе дозатора в качестве устройства для равномерной подачи материала к аппаратам его называют питателем. Одна из важных характеристик дозирующих устройств — точность дозирования. Это подача материала со-

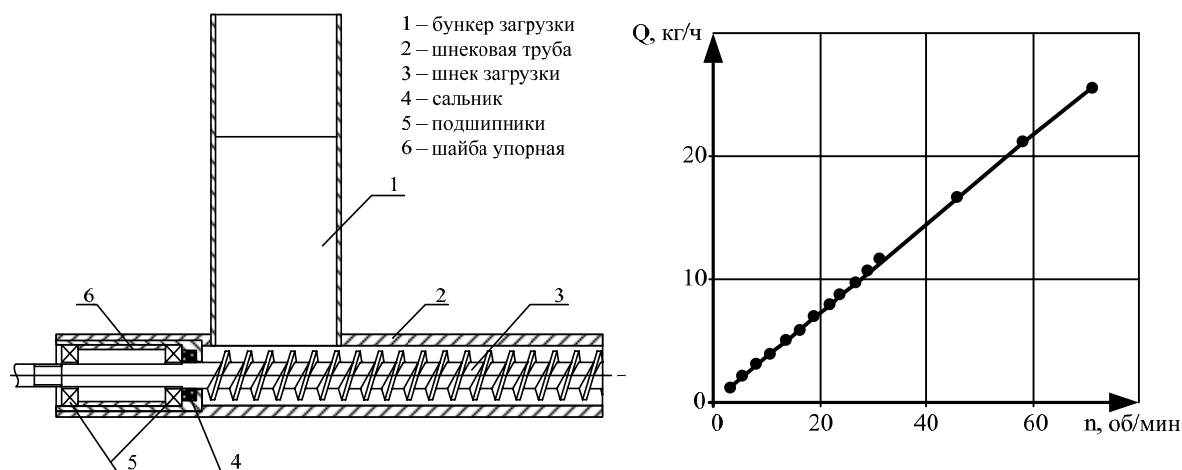


Рис. 1. Установка с горизонтальным шнеком и ее градуировочная характеристика

гласно уставке и в строгом соответствии с заданной регламентацией отклонения весовой производительности. На точность дозирования влияет большое число факторов. К ним относятся погрешности, обусловленные изменением свойств материала под воздействием внешних факторов. Поэтому выбор дозирующего оборудования определяется этими свойствами, требованиями к процессу и условиям эксплуатации [3].

Выбор конструкций отдельных элементов дозирующих установок и определение их параметров зависят от свойств тех насыпных грузов (НГ), для которых предназначена проектируемая установка. Ниже представлены требования, которым должны удовлетворять конструкции дозаторов ТСМ: а) возможность включения питателя под нагрузкой; б) быстрая блокировка в аварийных ситуациях; в) обеспечение требуемой производительности в широком диапазоне изменения свойств материала; г) надежность работы; д) минимальное число движущихся деталей; е) побудитель не должен препятствовать гравитационному выпуску; ж) незначительный износ рабочего органа; и) низкая стоимость, простота обслуживания и низкая потребляемая мощность; к) устойчивость дозирования при постоянном расходе; л) малая инерционность; м) плавность регулирования производительности [3].

Учитывая эти требования, а также требования, характерные для процесса фторирования ЗОУ, можно прийти к выводу о наибольшей пригодности к указанному процессу питателей с вращательным движением рабочего органа.

Действительно, гравитационные питатели просты и надежны, но из всех питателей дают наименьшую равномерность потока. Пневмотранспорт непригоден для указанного производства, так как аэрирующий агент нарушит нормальное течение процесса. Питатели с возвратно-поступательным движением рабочего органа не могут быть использованы в производстве гексафторида урана вследствие дискретности своей работы. Вибрационные питате-

ли обладают тем недостатком, что реакция фторирования будет происходить в питателе, а не в реакторе, вызывая спекание частиц сырья. Ленточные и пластинчатые питатели имеют открытый транспортный тракт, что недопустимо при дозировании ЗОУ. Из питателей с вращательным движением рабочего органа наиболее пригодными для установки их в УЗ реакторов фторирования являются шнеки, т. к., в отличие от тарельчатых и барабанных питателей, могут транспортировать ТСМ. К тому же, они компактны и безопасны в работе и обслуживании.

Таким образом, наиболее подходящими для дозирования ТСМ являются шнеки, т. е. дозаторы, установленные в настоящее время на УП ВОУ. Следовательно, причины недостатков в работе установки следует искать в условиях и режимах работы питателей. Поэтому авторами данной статьи были созданы экспериментальные установки, призванные выявить закономерности дозирования ТСМ, по физико-механическим свойствам близких к ЗОУ. Таким материалом является цемент.

Первой была создана установка с горизонтальным шнеком, рис. 1. В результате проведения серии экспериментов была получена градуировочная характеристика установки. Видно, что характеристика линейна. Однако было отмечено, что массового истечения не происходит, т. к. по мере высыпания материала из бункера образуется канал истечения, который охватывает область лишь над первыми витками шнека. Эта область определяет эффективную площадь истечения, которая значительно меньше полной. Поэтому данный метод дозирования не может быть рекомендован к применению для создания автоматизированной системы дозирования ТСМ.

Необходимость применения устройства, облегчающего эвакуацию материала приводит к идее о двухшнековой системе с применением питателя со сводообрушителем, расположенным вертикально и транспортирующем материал к горизонтальному шнеку, рис. 2.

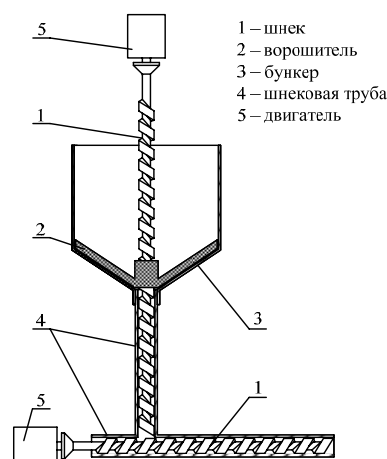
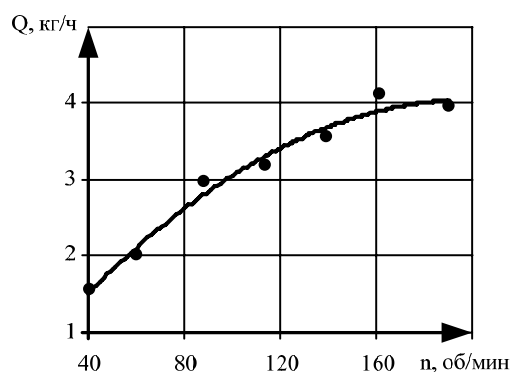


Рис. 2. Установка с двухшнековой системой и ее градуировочная характеристика



Первые эксперименты на указанной установке показали, что, несмотря на весьма малый радиус отверстия истечения (8 мм), сводообразование исключено. Было обнаружено, что производительность установки зависит в большей мере от частоты вращения вертикального шнека. Поэтому в дальнейших экспериментах частота вращения горизонтального шнека оставалась постоянной, а исследовалась зависимость производительности установки от частоты вращения вертикального шнека. Результатом этих исследований является график градуировочной характеристики.

Анализ результатов проведенных экспериментов выявил ряд особенностей работы модели УЗ. Было обнаружено, что зависимость производительности установки от частоты вращения вертикального шнека в целом носит нелинейный характер, а погрешность дозирования достигает 9,6 %. Поэтому установка с двухшнековой системой не удовлетворяет всем предъявляемым к ней требованиям и не может быть использована при создании системы автоматизированного управления процессом дозирования ТСМ.

Наиболее подходящей для дозирования сыпучих материалов была бы установка, сочетающая в себе положительные качества обеих установок, описанных выше. Тогда приходим к идее об одношнековой системе с вертикально расположенным шнеком, транспортирующем материал вниз, и ворошителем, укрепленным на нем.

Установка отличается от предыдущей тем, что горизонтальный шнек демонтирован. Эксперименты, проведенные на данной установке, выявили, что образование сводов в бункере исключено, а градуировочная характеристика имеет в целом линейный характер. Однако имеет место очень большая неравномерность дозирования, выражающаяся в больших доверительных интервалах, рис. 3.

То обстоятельство, что установка с вертикально расположенным шнеком пригодна для дозирования ТСМ, привело к необходимости ее более тща-

тельного изучения. Однако вертикальные шнеки, транспортирующие материал вниз, не нашли широкого применения в промышленности, поэтому не существует методик их теоретического расчета.

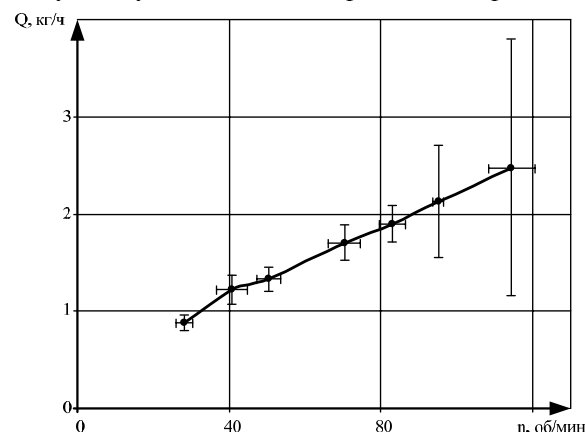


Рис. 3. Градуировочная характеристика установки с вертикальным шнеком

Таким образом, прежде чем начинать экспериментальные исследования особенностей дозирования ТСМ установкой с вертикально расположенным шнеком, необходимо выявить общие закономерности хранения и движения НГ, а также получить формулы для расчета теоретической производительности вертикального шнека, транспортирующего материал вниз.

Теория механики НГ дает формулу для расчета наибольшего диаметра выпускного отверстия в бункере, при котором еще возможно сводообразование [4]:

$$d = \frac{4\tau_0(1 + \sin \varphi_1)}{\gamma_0}, \quad (1)$$

где d – диаметр отверстия, м; τ_0 – начальное сопротивление сдвигу, кг/м²; φ_1 – угол внутреннего трения НГ, град; γ_0 – насыпной вес НГ, кг/м³. Примечательным является то, что в формулу (1) не входят параметры, характеризующие бункер, что подтверждается экспериментально [5]. Этим же объясняет-

ся и неработоспособность установки с горизонтально расположенным шнеком, описанной выше.

Рассчитаем диаметр сводаобразующего отверстия для цемента. Характеристики последнего имеют некоторый разброс, вследствие зависимости их от времени слеживания: $\tau_0=15...40$, $\varphi_1=26,5...40$, $\gamma_0=850...1600$. Поэтому величина диаметра будет изменяться от 5 до 30 см, т. е. свод может возникнуть практически в любом месте бункера, что требует применения ворошителя, обрушающего своды по всей высоте бункера.

Выведем основные соотношения для расчета вертикально расположенного шнека, транспортирующего материал вниз. Для этого воспользуемся теорией движения изолированной частицы материала массой m , движущейся в вертикальном винтовом конвейере и прижатой к стенке кожуха (рис. 4) [6–8].

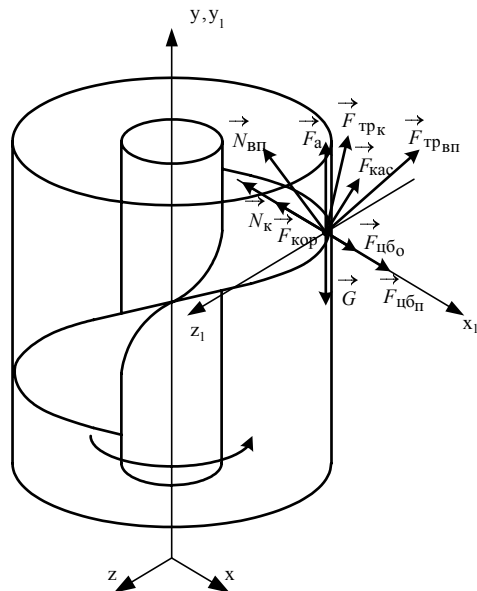


Рис. 4. Схема приложения сил, действующих на частицу

Согласно этой теории на движущуюся частицу, совпадающую в данный момент времени с некоторой точкой лопасти винта, действуют силы: $F_{тр_вп}=N_{вп}f_{2вп}$, $F_{тр_к}=N_кf_{2к}$ – силы трения о винтовую поверхность и о стенку кожуха соответственно, где $N_{вп}$, $N_к$ – нормальные реакции винтовой поверхности и стенки кожуха соответственно, $f_{2вп}$, $f_{2к}$ – коэффициенты трения материала о винтовую поверхность и о стенку кожуха соответственно; $G=mg$ – вес элемента материала, где g – ускорение свободного падения; $F_{кас}=mR(d^2\varphi/dt^2)$ – касательная сила инерции, где R – наружный радиус винта, φ – угол, на который отклоняется частица при вращении шнека с постоянной угловой скоростью ω_0 , $\varphi=f(t)$, t – время, $d\varphi/dt=\omega'$ – угловая скорость относительного движения радиус-вектора точки, в которой находится частица материала; $F_{цб_0}=mR\omega_0^2$, $F_{цб_0}=mR(d\varphi/dt)^2$ – центробежные силы инерции соответственно в переносном и относительном движении; $F_{кор}=mR\omega_0(d\varphi/dt)$ – сила Кориолиса; $F_а=ma(d^2\varphi/dt^2)$ – аксиальная сила инерции, где

$a=R\operatorname{tg}\alpha$ – параметр конвейера, $\alpha=\arctg(S/2\pi R)$ – угол подъема винтовой линии, S – шаг винта.

Составим основную систему дифференциальных уравнений, описывающих движение частицы материала, опирающуюся на винтовую поверхность и прижатую к стенке кожуха, для случая вертикального расположения оси винтового конвейера при движении частицы вниз:

$$\begin{cases} N_{вп} \cos \alpha + f_{2вп} N_{вп} \sin \alpha + \\ + ma \frac{d^2\varphi}{dt^2} - G + f_{2к} N_к \sin \beta = 0; \\ -N_{вп} \sin \alpha + f_{2вп} N_{вп} \cos \alpha - mR \frac{d^2\varphi}{dt^2} - \\ - f_{2к} N_к \cos \beta = 0; \\ mR\omega_0^2 - N_к + mR \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - 2mR\omega_0 \frac{d\varphi}{dt} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где β – угол между векторами переносной v_n и абсолютной v скоростей, или угловой параметр. Указанная система, представляет собой уравнения относительного движения в проекциях, взятых на оси координат.

Численные методы интегрирования и вычисления показывают, что период неустановившегося движения в вертикальных конвейерах, транспортирующих материал вверх, является кратковременным, и уже по истечении нескольких секунд или долей секунд движение становится устойчивым, с постоянными значениями средней осевой скорости и абсолютной угловой скорости вращательного движения [6]. Приняв предположение о применимости этих выводов к вертикальному шнеку, транспортирующему материал вниз, можно показать, что решением системы (2) является уравнение:

$$\frac{f_{2к}(R\omega_0^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \beta)(\cos \beta + \sin \beta \operatorname{tg}(\varphi_{2вп} - \alpha))}{g \sin^2(\alpha + \beta) \operatorname{tg}(\varphi_{2вп} - \alpha)} = 1, \quad (3)$$

где $\varphi_{2вп}=\arctg(\varphi_{2вп})$.

Из ур. (3) легко вычислить «критическую» частоту вращения шнека, при которой материал принимает участие лишь во вращательном движении:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g \operatorname{tg}(\varphi_{2вп} - \alpha)}{f_{2к} R}}. \quad (4)$$

Угловая частота вращения шнека, определенная по формуле (4), является наименьшей, начиная с которой к математическому исследованию шнеков можно применять зависимости, полученные для изолированной частицы.

Производительность винтового конвейера можно найти по формуле

$$Q = 2800v_1\psi\xi(D^2 - d^2)\gamma_0,$$

где v_1 – осевая составляющая абсолютной скорости частицы, м/с; ψ – коэффициент, учитывающий различие скоростей потока частицы; ξ – коэффициент заполнения витков шнека.

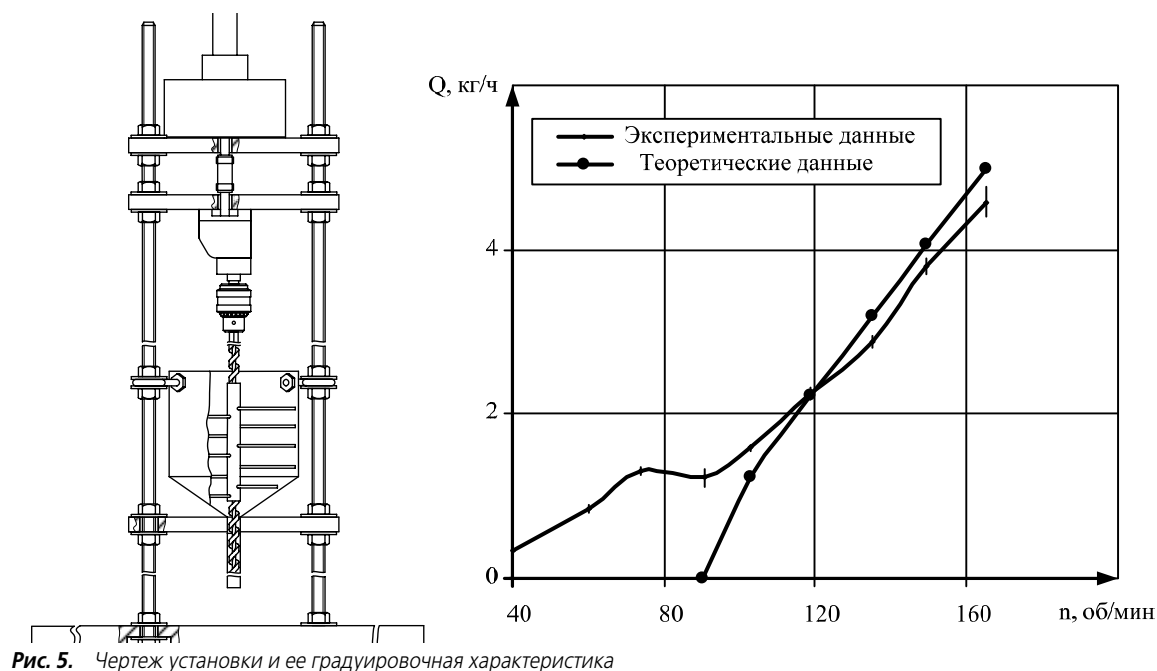


Рис. 5. Чертеж установки и ее градуировочная характеристика

Данные коэффициенты для горизонтальных, пологонаклонных, крутонаклонных и вертикальных шнеков, транспортирующих материал вверх, сведены в таблицы и графики [5, 6]. Однако для вертикальных шнеков, транспортирующих материал вниз, эти коэффициенты не известны и должны определяться из экспериментальных исследований.

Можно показать, что составляющая v_1 находится из выражения

$$v_1 = \frac{\omega_0 R \sin \alpha \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)},$$

куда подставляется значение углового параметра β . Последний находится решением уравнения (3) методом последовательных приближений.

На основании приведенных формул была спроектирована и создана установка, изображенная на рис. 5.

В отличие от описанной выше аналогичной установки, данная снабжена понижающим редуктором, снижающим влияния механических возмущений на частоту вращения, а также системой стабилизации частоты вращения. Изменению подверглась и конструкция ворошителя. Результатом экспериментального исследования установки является график, представленный на рис. 5. На этом же рисунке представлен график, полученный путем теоретического расчета производительности.

Видно, что график, полученный экспериментально, в области частот вращения, превышающих критическое значение, отражает линейную зависи-

мость. Максимального значения (8 %) погрешность дозирования достигает при частоте вращения 90 об/мин, что соответствует критической частоте вращения шнека. Там же происходит отклонение кривой градуировочной характеристики от линейной зависимости. Вместе с тем налицо отличие графиков зависимостей, что может быть обусловлено использованием для расчета усредненных величин, характеризующих материал.

Таким образом, исследовав питатели для дозирования трудносыпучих материалов и выделив из них те, которые наиболее полно удовлетворяют требованиям, предъявляемым условиями технологического процесса дозирования ТСМ, к применению в системе автоматизированного управления предлагается конструкция УЗ на основе вертикально расположенного шнека, транспортирующего материал вниз. Неоспоримыми преимуществами данной конструкции являются: *во-первых*, полное исключение сводообразования; *во-вторых*, возможность точного дозирования ТСМ через малые отверстия; *в-третьих*, простота конструкции с применением лишь одного привода, без применения дополнительных редукторов. Кроме того, конструкция обеспечивает возможность включения установки под нагрузкой, а также устойчивое дозирование, малую инерционность, плавность и линейность регулирования производительности, что делает ее применимой для автоматизированного управления технологическим процессом дозирования трудносыпучих материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хандорин Г.П., Короткевич В.М., Кобзарь Ю.Ф., Лазарчук В.В., Малый Е.Н., Мариненко Е.П., Матвеев А.А., Билялов Р.М., Хохлов В.А., Буйновский А.С. Использование оружейного ура-

на в качестве топлива энергетических ядерных реакторов // Известия вузов. Физика. – 2000. – Т. 43. – № 4. – С. 62–65.

2. Жиганов А.И., Гусев В.В., Андреев Г.Г. Технология диоксида урана для керамического ядерного топлива. – Томск: STT, 2002. – 328 с.

3. Катыльков А.В., Любартович В.А. Дозирование сыпучих и вязких материалов. — Л.: Химия, 1990. — 240 с.
4. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов (основания расчета погрузочных и транспортных устройств). — М.: Машиностроение, 1964. — 250 с.
5. Квапил Р. Движение сыпучих материалов в бункерах / Пер. с нем. А.И. Самодурова и О.А. Яковлева. — М.: Гос. научно-техн. изд-во лит-ры по горному делу, 1961. — 79 с.
6. Григорьев А.М. Винтовые конвейеры. — М.: Машиностроение, 1972. — 184 с.
7. Желтов В.П., Григорьев А.М. Расчет производительности крутонаклонных и вертикальных быстроходных шнеков, транспортирующих сыпучие материалы // Известия вузов. Горный журнал. — 1965. — № 10. — С. 118–126.
8. Штуков Н.К., Григорьев А.М. Картина распределения осевых скоростей материальной точки (частицы) в пределах окружности в транспортирующих шнеках // Известия вузов. Горный журнал. — 1967. — № 12. — С. 97–103.

Поступила 31.08.2007 г.

УДК 621.972

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МОЛОТКА. Ч. 1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ

А.Н. Глазов

Томский политехнический университет
E-mail: zvm@tpu.ru

Освещена методика и средства исследования температурного поля молотков. Рассмотрены закономерности рабочих процессов в камерах. Показано, что температура воздуха в рабочих камерах непрерывно меняется по времени и по пути ударника, а ее максимальное и среднее значение существенно выше температур сжатого воздуха и окружающей среды за исключением участка цилиндра с выхлопными окнами.

Ключевые слова:

Рубильный ручной пневматический молоток, экспериментальное исследование, методика, термопара, давление и температура воздуха в камерах, температурное поле, поверхность, резание, сталь, чугун.

Введение

В различных отраслях машиностроения широко применяются ручные пневматические рубильно-клепальные молотки для рубки, клепки, очистки литья, чеканки, зачистки швов и прочих работ. Работа молотков сопровождается тепловыми процессами и вибрацией. Локальная вибрация, выделяемое тепло и низкотемпературный отработанный воздух воздействуют на контактирующего с поверхностью инструмента человека и окружающую среду. Как известно, температура поверхности молотка и атмосферного воздуха является одним из решающих факторов в развитии вибрационной болезни.

Температура наружных поверхностей оборудования, интенсивность теплового облучения работающих должна соответствовать требованиям действующих санитарных правил к микроклимату производственных помещений. В целях профилактики тепловых травм температура поверхности технологического оборудования должна соответствовать требованиям санитарных правил [1] и ее допустимая величина при контактном периоде до 8 ч и более составляет 43 °С. Гигиенические требования к температуре рукояток и их поверхности определяются температурой поверхности рукояток ручных молотков, которая должна находиться в пределах от 21,5 до 40 °С, а оптимальным является диапазон от 25 до 32 °С [1].

По нашим данным, экспериментальная оценка температурного поля поверхности пневматических молотков ранее не производилась. Отсутствует и методика проведения таких исследований.

Данные о тепломассообменных процессах необходимы: для развития теории, расчета и создания пневмоударных механизмов; для выработки соответствующих гигиенических требований с учетом условий эксплуатации молотков и правильной организации труда; при определении влияния теплового состояния молотков на микроклимат производственного помещения.

Исходя из вышеизложенного, целью настоящей работы являлось исследование закономерностей распределения температуры в молотке при различных условиях его эксплуатации.

Объекты и средства исследования

Исследовались рубильный молоток М-6 и рукоятки молотков М-5, М-6, КЕ-22 при давлении сжатого воздуха 0,5 МПа.

Для измерения и регулирования параметров сжатого воздуха применялся специальный стенд [2]. Использовались тензометрические датчики давления. Мгновенная температура воздуха в рабочих камерах измерялась датчиками сопротивления с термочувствительным элементом в виде вольфра-